

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.008

# 苗间锄草机器人锄草刀优化设计\*

黄小龙<sup>1,2</sup> 刘卫东<sup>1</sup> 张春龙<sup>1</sup> 张妍<sup>1</sup> 李伟<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京信息科技大学机电工程学院, 北京 100192)

**【摘要】** 建立了苗间锄草机器人锄草刀的运动学模型, 并通过仿真锄草刀工作过程设计了锄草刀的运动轨迹。选取锄草刀的不同参数和水平进行正交试验, 将覆盖率 and 入侵率代替除草率和伤苗率作为评价指标, 分析了锄草刀直径、豁口夹角、刀刃切除距离、锄草刀圆心与作物秧苗行线的偏距等因素对苗间除草效果的影响, 优化出最佳结构参数组合为: 锄草刀直径 175 mm、豁口夹角 140°、锄草刀圆心与作物秧苗行线的偏距 45 mm、刀刃切除距离 10 mm。验证试验结果表明, 模拟仿真及正交试验优化结果准确有效, 样机作业效果良好, 平均除草率为 88.5%, 伤苗率仅为 1.6%。

**关键词:** 锄草机器人 锄草刀 苗间锄草 参数优化 正交试验

中图分类号: S224.1; TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)06-0042-05

## Optimal Design of Rotating Disc for Intra-row Weeding Robot

Huang Xiaolong<sup>1,2</sup> Liu Weidong<sup>1</sup> Zhang Chunlong<sup>1</sup> Zhang Yan<sup>1</sup> Li Wei<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Mechanical & Electrical Engineering School, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

### Abstract

The kinematics model was established for the rotating disc of intra-row weeding robot, and the trajectory of the rotating disc was designed by simulating its working process. Then the virtual orthogonal experiment was made in different factors and different levels. In order to optimize the best operational parameters in combination, the effects of weeding performances of the rotating disc in diverse parameters were analyzed by taking the coverage rate and the inbreaking rate as evaluation indexes. The experiment results verified that the simulation and orthogonal experiment were accurate and efficient with a good operation effectiveness of the prototype, and the weeding rate reached to 88.5%, yet the wounded seedling rate was only 1.6%.

**Key words** Weeding robot, Rotating disc, Intra-row weeding, Parameter optimization, Orthogonal experiment

### 引言

传统的杂草控制方法是靠人工除草或者化学除草。人工除草工作量大、效率低; 化学除草会给生态环境、农产品食用安全以及人体健康等带来严重问题<sup>[1-2]</sup>。而机械除草在摒弃化学除草的同时可大幅度提高工作效率, 因此机械除草开始受到越来越多

的重视。

机械除草适用于机械化程度较高的农场。按照杂草在农田中生长的区域位置可将其划分为行间杂草与苗间杂草。苗间杂草是机械除草的难点, 不仅要求除草设备的智能化程度高, 且对锄具的设计提出了一定要求。Sørensen 等开发了一种名为 HortiBot 的除草机器人, 可在苗间完成拔草耕翻作

收稿日期: 2011-08-02 修回日期: 2011-08-24

\* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B07)、国家自然科学基金资助项目(31071320、31101079)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090008110007)和中国农业大学研究生科研创新专项资助项目

作者简介: 黄小龙, 博士生, 北京信息科技大学高级实验师, 主要从事现代机械设计理论与方法、农业机器人研究, E-mail: gxhxl@sohu.com

通讯作者: 李伟, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机视觉检测、农业机器人研究, E-mail: liww@cau.edu.cn

业<sup>[3]</sup>。Nørremark 等研制了一种苗间除草装置,可通过控制弹齿在苗间的运动轨迹使其具有避苗动作<sup>[4]</sup>。张春龙等设计了一种智能锄草机器人,根据机器视觉获取的苗草位置信息可完成锄草和避苗等作业<sup>[5]</sup>。刘继展、陈树人等设计了可用于除草机器人的六爪执行机构及八爪执行机构<sup>[6-7]</sup>。韩豹等研制了水平圆盘式苗间除草装置<sup>[8]</sup>。但上述苗间除草装置内部机构过于复杂。Dedousis 等对锄草刀具进行了数学建模和运动学仿真分析,提出了一种具有豁口的盘形锄草刀,其结构简单,由液压驱动旋转,以刀具内切面割除苗间杂草,并可利用豁口达到避苗目的<sup>[9-10]</sup>。

本文对苗间锄草机器人锄草刀的运动轨迹进行模拟仿真,采用正交试验对锄草刀的结构参数进行优化,得出最佳参数组合,为锄草刀的设计提供理论依据,并通过验证试验对优化结果进行检验。

## 1 锄草刀运动轨迹规划

### 1.1 苗间锄草机器人及锄草刀结构

苗间锄草机器人如图 1 所示。该机器人末端执行器的锄草刀具有一个豁口,用于躲避作物秧苗,避免锄草刀伤苗。工作时锄草刀除了随机器人前进之外,还绕其自身轴线旋转,从而完成切割、铲除杂草的动作,同时通过机器人的视觉及控制系统控制锄草刀的转速与转角,使锄草刀接近作物秧苗时其豁口正对作物秧苗,完成避苗动作,如图 2 所示。

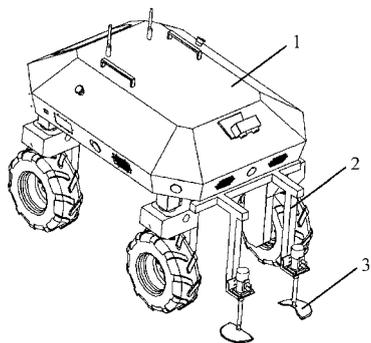


图 1 苗间锄草机器人

Fig. 1 Intra-row weeding robot

1. 机器人移动平台 2. 机械臂 3. 锄草刀

### 1.2 锄草刀运动学模型

以锄草刀在起始位置时的圆心为坐标原点,  $x$  轴方向为机器人前进方向, 锄草刀绕其自身轴线顺时针旋转。锄草刀的运动过程为锄草刀随机器人前进和锄草刀绕其自身轴线旋转运动的合成。选刀刀的顶部  $E$  点为研究对象, 设该点在  $t=0$  时处于如图 3a 所示位置, 任意时刻位置如图 3b 所示, 则该点的运动轨迹方程为

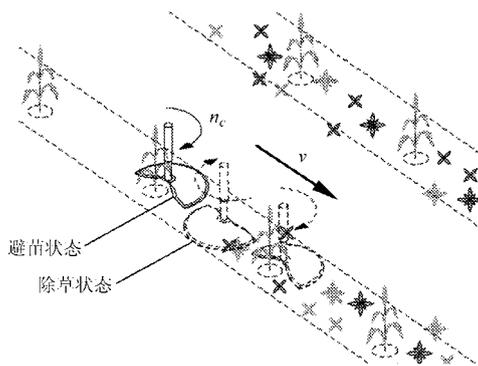


图 2 锄草过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of weeding process

$$\begin{cases} x_E = vt + R\cos\theta \\ y_E = R\sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\theta = \alpha + \frac{n_c \pi}{30} t$$

$$\alpha = \arcsin\left(\sin\left(\frac{180 - \phi}{2}\right) - \frac{l}{R}\right)$$

式中  $R$ ——锄草刀半径, mm

$\theta$ ——任意时刻  $E$  点径向线与  $x$  轴夹角, ( $^\circ$ )

$\alpha$ ——开始时刻  $E$  点径向线与  $x$  轴夹角, ( $^\circ$ )

$\phi$ ——锄草刀豁口夹角, ( $^\circ$ )  $t$ ——时间, s

$l$ ——锄草刀刀刃切除距离, mm

$v$ ——锄草机器人前进速度, mm/s

$n_c$ ——锄草刀转速, r/min

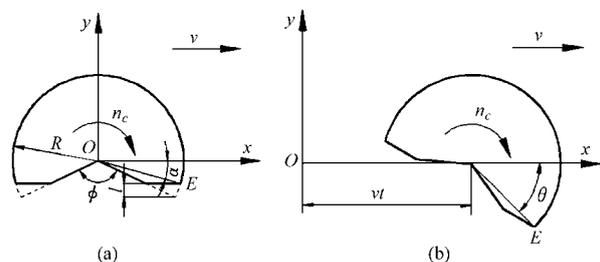


图 3 运动分析图

Fig. 3 Diagram of kinematics

(a) 锄草刀初始位置 (b) 任意时刻锄草刀位置

### 1.3 锄草刀运动轨迹仿真

当作物秧苗间距为  $d$  时, 为使锄草机器人能完成苗间锄草及避苗动作, 需满足

$$n_c = \frac{d}{60} v \quad (2)$$

应用计算机对锄草刀在两棵苗之间区域的工作过程进行了模拟仿真, 其运动轨迹如图 4 所示。在锄草刀开始工作前, 需要进行对刀动作, 使锄草刀的豁口正对作物秧苗。

## 2 锄草刀优化设计

### 2.1 评价指标

苗间锄草机器人的作业效果主要取决于除草率

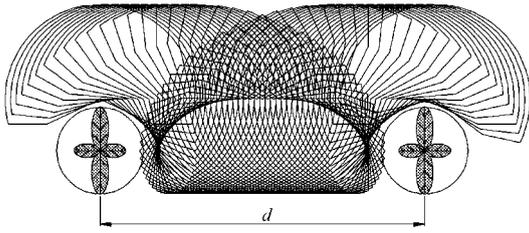


图4 锄草刀工作过程仿真

Fig. 4 Simulation of rotating disc working process

和伤苗率。而锄草刀的结构参数是影响除草率和伤苗率重要因素之一。除草率与除草作业前、后的杂草株数相关,伤苗率与作业后损伤的作物秧苗株数相关<sup>[11]</sup>。由于目前尚未开展杂草生长状况模拟,较难获取杂草的株数以及损伤的作物秧苗株数,故取覆盖率和入侵率代替除草率和伤苗率作为评价指标。覆盖率和入侵率直接影响着除草率和伤苗率,覆盖率越大,除草效果越好;入侵率越小,伤苗概率越小。

### 2.1.1 覆盖率

图5为锄草刀在苗间区域锄草示意图。根据作物秧苗根系的大小设置一个保护带,其直径为 $b$ ,保护带内的杂草不消除。区域1为锄草刀覆盖区域;区域2为锄草刀未覆盖区域,该区域内的杂草未能被割除;区域3为锄草刀入侵保护带区域。

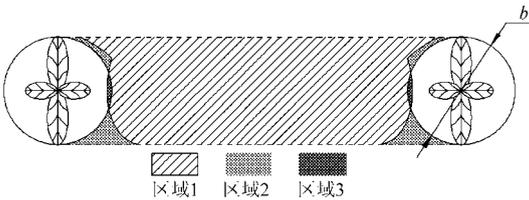


图5 苗间区域锄草示意图

Fig. 5 Simulation of intra-row weeding area

覆盖率计算公式为

$$f = \frac{M_f}{M_f + M_w} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $f$ ——覆盖率, %

$M_f$ ——锄草刀覆盖区域面积,  $\text{mm}^2$

$M_w$ ——锄草刀未覆盖区域面积,  $\text{mm}^2$

### 2.1.2 入侵率

入侵率计算公式为

$$r = \frac{M_r}{M_b} \times 100\% \quad (4)$$

式中  $r$ ——入侵率, %

$M_r$ ——锄草刀入侵保护带面积,  $\text{mm}^2$

$M_b$ ——保护带面积,  $\text{mm}^2$

## 2.2 影响因素

锄草刀的结构参数包括锄草刀直径、豁口夹角、刀刃切除距离、刃角、隙角、切土角、碎土角和入土角

等。其中锄草刀直径、豁口角度、刀刃切除距离是影响锄草刀覆盖率与入侵率的主要因素,而刃角、隙角、切土角、碎土角和入土角等并不影响锄草刀的覆盖率与入侵率,故本文不讨论。此外,锄草刀圆心与作物秧苗行线的偏距也是影响锄草刀覆盖率与入侵率的主要因素之一。因此,选取锄草刀直径 $A$ 、豁口夹角 $B$ 、锄草刀圆心与作物秧苗行线偏距 $C$ 、刀刃切除距离 $D$ 作为优化参数,如图6所示。

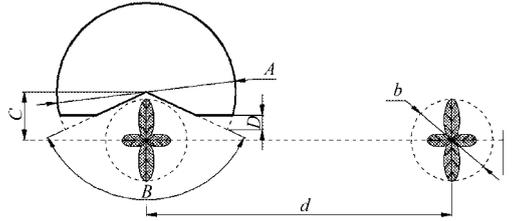


图6 锄草刀结构参数

Fig. 6 Structure parameters of rotating disc

## 2.3 正交试验设计

选用 $L_{16}(4^5)$ 正交试验表进行试验,试验因素和水平如表1所示。在试验过程中,作物秧苗的保护带直径 $b$ 为80 mm,苗距 $d$ 为300 mm。正交试验方案与试验结果如表2所示。

表1 试验因素与水平

Tab. 1 Experimental factors and levels

水平	因素			
	直径 $A/\text{mm}$	夹角 $B/(\circ)$	偏距 $C/\text{mm}$	距离 $D/\text{mm}$
1	165	120	45	0
2	170	130	50	5
3	175	140	55	10
4	180	150	60	15

## 2.4 数据分析

结果分析如表3所示。由表3对试验结果进行极差分析,根据极差大小排出因素 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 对2个性能指标影响的因素优水平、主次顺序及优化组合。

覆盖率的优化组合为 $C_1A_4B_1D_1$ ,即锄草刀直径180 mm、豁口夹角 $120^\circ$ 、锄草刀圆心与作物秧苗行线的偏距45 mm、刀刃切除距离0 mm。

对于覆盖率性能指标,锄草刀圆心与作物秧苗行线的偏距对其影响最大,偏距越小,锄草刀在苗间的覆盖率越高。主要原因是:锄草刀越靠近作物秧苗,锄草时锄草刀扫过的覆盖区域越大。锄草刀直径对其影响次之,刀刃切除距离对其影响最小。

入侵率的优化组合为 $B_4D_4A_2C_4$ ,即锄草刀直径170 mm、豁口夹角 $150^\circ$ 、锄草刀圆心与作物秧苗行线偏距60 mm、刀刃切除距离15 mm。

表 2 正交试验方案与试验结果

Tab. 2 Schemes and results of orthogonal experiment

试验号	空白	A	B	C	D	试验结果		试验号	空白	A	B	C	D	试验结果	
						覆盖率 $f/\%$	入侵率 $r/\%$							覆盖率 $f/\%$	入侵率 $r/\%$
1	1	1	1	1	1	94.46	15.98	9	3	1	3	4	2	70.57	0
2	1	2	2	2	2	88.53	6.24	10	3	2	4	3	1	79.31	0.40
3	1	3	3	3	3	82.66	0.76	11	3	3	1	2	4	91.94	6.70
4	1	4	4	4	4	76.24	0	12	3	4	2	1	3	96.35	8.73
5	2	1	2	3	4	75.81	0	13	4	1	4	2	3	77.95	0
6	2	2	1	4	3	76.44	6.37	14	4	2	3	1	4	90.04	0
7	2	3	4	1	2	91.99	0.15	15	4	3	2	4	1	80.44	13.09
8	2	4	3	2	1	94.67	11.53	16	4	4	1	3	2	90.12	20.67

表 3 试验结果分析

Tab. 3 Results and analysis of experiment

参数	覆盖率 $f/\%$				入侵率 $r/\%$			
	A	B	C	D	A	B	C	D
$K_1$	79.697	88.240	93.210	87.220	3.995	12.430	6.215	10.250
$K_2$	83.580	85.282	88.272	85.302	3.252	7.015	6.117	6.765
$K_3$	86.757	84.485	81.975	83.350	5.175	3.072	5.458	3.965
$K_4$	89.345	81.373	75.922	83.508	10.232	0.138	4.865	1.675
极差 $R$	9.648	6.867	17.288	3.870	6.980	12.292	1.350	8.575
优水平	$A_4$	$B_1$	$C_1$	$D_1$	$A_2$	$B_4$	$C_4$	$D_4$
主次因素	$C, A, B, D$				$B, D, A, C$			

对于入侵率性能指标, 锄草刀豁口夹角对其影响最大, 豁口夹角越大, 锄草刀入侵作物秧苗保护带的概率越小。主要原因是: 锄草刀的豁口可起到躲避作物秧苗的作用, 豁口夹角越大, 其避苗效果越好。刀刃切除距离对其影响次之, 锄草刀圆心与作物秧苗行线的偏距对其影响最小。

因素不同水平对覆盖率和入侵率的影响如图 7、8 所示。

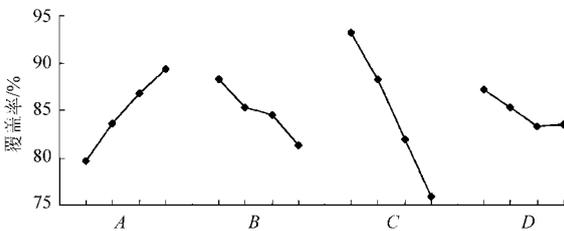


图 7 因素水平对覆盖率影响

Fig. 7 Trend of factor level and coverage rate

由图 7、8 可以看出, 覆盖率与入侵率相互牵制, 覆盖率越大, 入侵率也越大。需权衡二者关系, 故综合平衡分析试验因素对 2 个试验性能指标的影响及其因素的优化组合, 选出  $A_3 B_3 C_1 D_3$ 、 $A_3 B_3 C_1 D_2$ 、 $A_3 B_2 C_1 D_3$  和  $A_3 B_2 C_1 D_2$  4 个组合方案。

选出 4 个方案均不在已作过的 16 组试验中, 必须追加试验, 结果如表 4 所示。

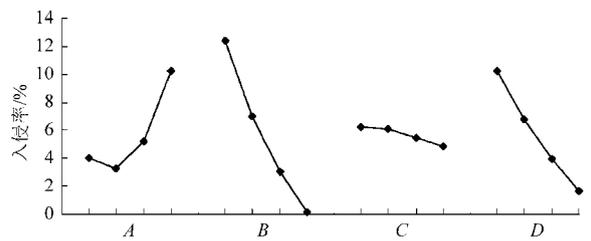


图 8 因素水平对入侵率影响

Fig. 8 Trend of factor level and inbreaking rate

表 4 追加试验及结果

Tab. 4 Additional experiment and results

试验号	A	B	C	D	试验结果	
					覆盖率 $f/\%$	入侵率 $r/\%$
17	3	3	1	3	93.23	0.84
18	3	3	1	2	94.42	3.63
19	3	2	1	3	95.50	5.14
20	3	2	1	2	96.32	9.47

与试验号 7 (覆盖率 91.99%、入侵率 0.15%) 和试验号 14 (覆盖率 90.04%、入侵率 0%) 的方案比较, 这 4 个方案得到的试验结果覆盖率均高于 93%, 但是在实际锄草作业过程中, 由于会受到其他因素影响, 锄草机器人的伤苗率会偏高, 故希望入侵率越小越好。为此以覆盖率尽可能高、入侵率在

1%以下,确定最优组合为 $A_3B_3C_1D_3$ ,即锄草刀直径175 mm、豁口夹角 $140^\circ$ 、锄草刀圆心与作物秧苗行线的偏距45 mm、刀刃切除距离10 mm,对应覆盖率93.23%、入侵率为0.84%。

### 3 试验验证与分析

为进一步考察优选参数的作业效果,采用最优参数制造锄草刀,锄草机器人安装视觉及控制系统,在中国农业大学上庄实验站的白菜地进行锄草试验。菜地长30 m,苗距平均为300 mm,锄草试验时间为白菜苗移栽后第7天,机器人移动速度为0.5 m/s左右,苗带宽度取80 mm。除草率及伤苗率测定方法参照文献[11],每次试验取3个测定点采集数据,取平均值,结果如表5所示。

表5 验证试验结果

Tab.5 Results of verifiable experiment %

试验号	除草率	伤苗率
1	87.6	1
2	88.4	2
3	86.8	0
4	89.1	2
5	90.4	3
平均值	88.5	1.6

由表5可看出,样机作业效果良好,平均除草率为88.5%,伤苗率仅为1.6%。除草率与仿真得到的覆盖率相比,其值偏小;伤苗率与仿真得到的入侵率相比,其值偏大,原因有:机器人控制系统存在一定的误差;机器人视觉系统获取农作物秧苗的信息存在一定的误差;地面存在凹凸不平现象。

### 4 结论

(1)通过正交试验得出锄草刀结构参数对覆盖率的影响,其影响大小顺序依次为锄草刀圆心与作物秧苗行线的偏距、锄草刀直径、豁口夹角、刀刃切除距离;对入侵率的影响,其影响大小顺序依次为豁口夹角、刀刃切除距离、锄草刀直径、锄草刀圆心与作物秧苗行线的偏距。覆盖率和入侵率直接影响着除草率和伤苗率,覆盖率越大,除草效果越好;入侵率越小,伤苗概率越小。

(2)由试验得到的优化结果为:锄草刀直径175 mm、豁口夹角 $140^\circ$ 、锄草刀圆心与作物秧苗行线的偏距45 mm、刀刃切除距离10 mm。

(3)采用优化结果制造锄草刀并进行试验,试验效果良好,平均除草率为88.5%,伤苗率仅为1.6%,验证了优化结果准确有效。

### 参 考 文 献

- 李江国,刘占良,张晋国,等. 国内外田间机械除草技术研究现状[J]. 农机化研究,2006(10):14~16.  
Li Jianguo, Liu Zhanliang, Zhang Jinguo, et al. Review of mechanical weeding technique in field at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(10): 14~16. (in Chinese)
- 马超. 浅谈我国田间机械除草现状及发展趋势[C]//中国农业机械学会第四届青年学术年会论文集,2007:132~135.
- Sørensen C G, Nørremark M, Jørgensen R N, et al. HortiBot: feasibility study of a plant nursing robot performing weeding operations-part IV[C]//2007 ASABE Annual International Meeting. Minneapolis, USA, Paper 077019, 2007.
- Nørremark M, Griepentrog H W, Nielsen J, et al. The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(11):396~410.
- 张春龙,黄小龙,耿长兴,等. 智能锄草机器人系统设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7):196~199,185.  
Zhang Chunlong, Huang Xiaolong, Geng Changxing, et al. Design and simulation of intelligent weeding robot system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7):196~199,185. (in Chinese)
- 江苏大学. 一种除草机器人的六爪执行机构:中国,200810019830.3[P]. 2008-08-13.
- 江苏大学. 一种应用于除草机器人的八爪执行机构:中国,200910024820.3[P]. 2009-07-22.
- 韩豹,吴文福,申建英,等. 水平圆盘式苗间除草装置试验台优化试验[J]. 农业工程学报,2010,26(2):142~146.  
Han Bao, Wu Wenfu, Shen Jianying. Optimization experiment on test-bed of horizontal disk weeding unit between seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2):142~146. (in Chinese)
- Dedousis A P, Godwin R J. The rotating disc-hoe-an overview of the system for mechanical weed control[C]//2008 ASABE Annual International Meeting. Rhode Island, USA, Paper 083438, 2008.
- O'Dogherty M J, Godwin R J, Dedousis A P, et al. A mathematical model of the kinematics of a rotating disc for inter-and intra-row hoeing[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(2):169~179.
- JB/T 7864—1999 旱田中耕追肥机试验方法[S]. 1999.  
JB/T 7864—1999 Test methods of cultivator-fertilizer[S]. 1999. (in Chinese)